

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.04.003

# 光束偏振对全息干涉制作复式光子晶体的影响研究

戚志明<sup>1</sup>, 梁文耀<sup>2\*</sup>

(1 广东开放大学(广东理工职业学院), 广东 广州 510091;  
2 华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 光子晶体分为简单光子晶体和复式光子晶体,激光全息法是制作复式光子晶体的重要方法之一,光束偏振在其中扮演着重要角色。利用具有一定对称性的四光束配置干涉产生复式光子晶体,通过 Matlab 编程进行数值仿真,系统研究了不同偏振组合(包括单光束、双光束、三光束和四光束)对复式光子晶体元胞形状及干涉对比度的影响。结果表明,各光束的偏振度及旋转角度均对复式光子晶体具有显著影响。在不同偏振条件下获得了一系列丰富的元胞形状,如波浪条纹、椭圆柱、锯齿状等。此外,发现当各光束均为线偏振光时具有最佳的干涉对比度。上述研究结果对制作特殊元胞的复式光子晶体和虚拟实验教学具有一定的理论指导意义。

**关键词:** 量子光学; 复式光子晶体; 激光全息法; 偏振组合; 数值仿真

中图分类号: O436 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2023)04-00447-11

## Influence of beam polarizations on holographic fabrication of compound photonic crystals

QI Zhiming<sup>1</sup>, LIANG Wenyao<sup>2\*</sup>

(1 The Open University of Guangdong (Guangdong Polytechnic Institute), Guangzhou 510091, China;  
2 School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Photonic crystals (PCs) can be divided into simple PCs and compound PCs. Laser holographic interferometry is one of the important methods in the fabrication of compound PCs, in which beam polarization plays an important role. By using a four-beam configuration with certain symmetry to produce compound PCs, numerical simulations are conducted using Matlab programming to systematically study the influence of various polarization combinations (including single-beam, double-beam, three-beam, and four-beam cases) on the unitcell shape and interference contrast of the compound PCs. The research results show that the polarization degree and rotation angle of each beam have a significant effect on the compound PCs. Under different polarization conditions, a series of rich unitcell

基金项目: 国家自然科学基金(12074127), 广东省自然科学基金(2023A1515010951), 中国高等教育学会理科教育专业委员会研究课题(21ZSLKJYYB14), 2022年度广东省本科高校教学质量与教学改革工程项目(x2wl/C9233016), 2023年华南理工大学学生研究计划(x2wl/C9237240)

作者简介: 戚志明(1979-), 硕士, 副研究员, 主要从事光子晶体和计算机仿真方面的研究。E-mail: zhiming\_qi@qq.com

收稿日期: 2023-02-25; 修改日期: 2023-04-10

\*通信作者。E-mail: liangwenyao@scut.edu.cn

shapes, such as wavy stripes, elliptical cylinders, zigzags, are obtained. In addition, it is found that when all the interference beams are linearly polarized, the compound PCs have the optimal contrast. The results obtained in this work have certain theoretical guidance significance for the experimental fabrication of compound PCs with various unitcell shapes, as well as the development of virtual experimental research.

**Key words:** quantum optics; compound photonic crystals; laser holography method; polarization combinations; numerical simulations

## 0 引言

光子晶体是由不同材料周期排列而成的人工微结构<sup>[1,2]</sup>, 具有独特光子禁带、光子局域特征<sup>[3,4]</sup>, 以及与光子通带密切相关的负折射、超透镜、超慢光、光吸收等新奇物理效应<sup>[5-9]</sup>, 能够在亚波长尺度上灵活操控光波的运动, 具有重要的基础研究意义和广阔的应用前景。通过类比固体晶体分类, 光子晶体可分为仅含单套晶格的简单晶格光子晶体(即简单光子晶体)和由多套简单晶格嵌套而成的复式晶格光子晶体(即复式光子晶体)<sup>[10]</sup>。其中, 复式光子晶体拥有许多可设计参数和调控自由度, 蕴含着更加丰富的物理特性和应用潜力, 例如通过改变结构参数可降低复式光子晶体的对称性, 从而有效扩大完全光子带隙的范围<sup>[11]</sup>。可以预见, 复式光子晶体将为进一步研究人工微结构的新颖物理性质及其应用提供更加广阔的舞台。

近年来, 激光全息技术广泛应用于涡旋光束设计、微纳结构制作等领域<sup>[12-18]</sup>。在光子晶体制作方面, 研究人员提出了激光全息法<sup>[13-18]</sup>、逐层叠加法<sup>[19]</sup>、半导体微加工法<sup>[20]</sup>、胶体自组装法<sup>[21]</sup>等制作方法, 其中, 激光全息法以其面积大、图案丰富、成本低、调节灵活等优点吸引了人们的广泛关注。如改变干涉光束的数量、方向、偏振、光强等参数(即改变光束配置), 干涉结果会随之改变。因此, 只要参数选择得当, 就可以利用激光全息法产生不同维度、不同晶格类型、甚至不同元胞形状的微结构。迄今为止, 利用这一方法已经成功制备了周期结构<sup>[13-15]</sup>、准周期结构<sup>[18]</sup>、螺旋光子晶体<sup>[22]</sup>和缺口环超材料<sup>[23]</sup>等多种微结构。还可以根据需求对微结构进行二次加工, 例如填充高折射率介电材料、引入额外光束产生周期缺陷等。激光全息法不仅适用于制作简单光子晶体, 在复式光子晶体制作方面也具有独特的优势。然而, 由于光束偏振种类很多, 不仅包括线偏振和圆偏振, 还包括不同偏振度的椭圆偏振态, 其组合繁多, 对激光全息制作光子晶体具有显著的影响, 导致在实验操作过程中存在一定的盲目性。因此, 需要深入研究光束偏振对复式光子晶体的元胞形状和对比度等方面的影响, 为实验制作提供必要的理论指导。

本文以二维复式光子晶体为研究对象, 基于多光束干涉原理提出了一种四光束配置来产生复式光子晶体, 进一步利用计算机编程进行数值仿真, 按照单光束、双光束、三光束和四光束4种情况系统研究了偏振改变或旋转对复式光子晶体的影响。结果表明, 无论是偏振变化(线偏振-椭圆-圆偏振-线偏振)还是偏振旋转, 均对复式光子晶体的元胞形状及对比度具有显著影响, 在不同偏振条件下获得了波浪条纹、椭圆柱、锯齿状等丰富的元胞形状。这些结果对设计和制作特定元胞形状的光子晶体具有一定的理论指导意义。

## 1 理论分析

### 1.1 激光全息干涉法基本原理

激光全息干涉法制作微结构的本质是利用多束相干光产生有序干涉图案, 进而通过光与物质的相互作用将干涉图案记录在工作介质上。利用平面波近似, 假如有  $N$  束同频率的光束参与干涉, 第  $j$  束光表达式为

$E_j(\mathbf{r}) = E_j \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j)] \mathbf{e}_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ), 其中  $E_j$ 、 $\mathbf{k}_j$ 、 $\delta_j$  和  $\mathbf{e}_j$  分别表示振幅、波矢、初相位和偏振方向。由于线偏振、圆偏振可以看做椭圆偏振光的特例, 为了方便后续研究, 将任意偏振  $E_j$  分解为两个互相垂直、相位差为  $90^\circ$  的线偏振分量 ( $E_{aj}$ ,  $E_{bj}$ ), 即

$$E_j = E_{aj} + E_{bj} = E_{aj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j)] \mathbf{e}_{aj} + E_{bj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j - \pi/2)] \mathbf{e}_{bj}, \quad (1)$$

式中:  $E_{aj}$  (或  $E_{bj}$ )、 $\mathbf{e}_{aj}$  (或  $\mathbf{e}_{bj}$ ) 分别表示  $E_{aj}$  (或  $E_{bj}$ ) 的振幅和偏振方向。故  $N$  束光的总干涉光强为<sup>[13]</sup>

$$I(\mathbf{r}) = \left| \sum_j E_{aj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j)] \mathbf{e}_{aj} + \sum_j E_{bj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j - \pi/2)] \mathbf{e}_{bj} \right|^2 =$$

$$\sum_j (E_{aj}^2 + E_{bj}^2) + \sum_{i < j} 2E_{ai} E_{aj} \mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{aj} \cos(\mathbf{G}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij}) + \sum_{i < j} 2E_{bi} E_{bj} \mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{bj} \cos(\mathbf{G}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij}) +$$

$$\sum_{i < j} 2E_{ai} E_{bj} \mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{bj} \cos(\mathbf{G}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij} - \pi/2) + \sum_{i < j} 2E_{bi} E_{aj} \mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{aj} \cos(\mathbf{G}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij} + \pi/2), \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{G}_{ij} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$  和  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$  为第  $i$ 、 $j$  束光的波矢差和初相位差。由(2)式可知, 任意两束光干涉形成一维晶面, 各晶面相对强弱不仅与  $E_{aj}$ 、 $E_{bj}$  等振幅强度有关, 而且还取决于其偏振夹角 (如  $\mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{aj}$ 、 $\mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{bj}$ )。所有一维晶面叠加形成最终微结构, 可见偏振组合在微结构的元胞形状设计及调控中扮演着关键角色。

### 1.2 光束配置设计

复式光子晶体需要引入 4 束或更多的非共面光束发生干涉。为简单起见, 选择最低限度的 4 束光来产生二维复式光子晶体, 其光束配置如图 1(a) 所示。4 束同频率的光束汇聚于  $+z$  轴, 它们的分布具有一定的空间对称性,  $\mathbf{k}_1 \sim \mathbf{k}_4$  的极角 (即各光束与  $+z$  轴的夹角) 均为  $30^\circ$ , 其方位角 (即各光束在  $xoy$  平面的投影与  $+x$  轴的夹角) 分别为  $-45^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $180^\circ$ 。 $E_{aj}$  分量的方向设定为垂直于第  $j$  束光的平面与  $xoy$  平面的交线, 其大小为振幅  $E_j$  在该方向的投影, 而  $E_{bj}$  直接由  $\mathbf{k}_j \times \mathbf{E}_{aj}$  计算获得,  $E_{aj}$ 、 $E_{bj}$ 、 $\mathbf{k}_j$  三者构成右手系。

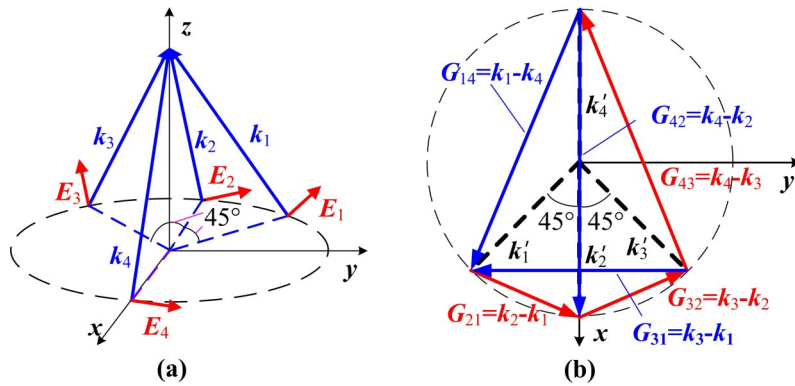


图 1 (a) 产生二维复式光子晶体的光束配置图; (b) 光束配置在  $xoy$  平面的投影, 其中  $\mathbf{k}_1 \sim \mathbf{k}_4$  为各波矢的投影矢量

Fig. 1 (a) The beam configuration for compound PCs. (b) The projected beam configuration in  $xoy$  plane, and  $\mathbf{k}_1 \sim \mathbf{k}_4$  are the projected wave vectors

由 (2) 式可知, 波矢差  $\mathbf{G}_{ij}$  在周期微结构的形成中起着关键作用。图 1(b) 为光束配置在  $xoy$  平面的投影图, 由于干涉光束数量  $N = 4$ , 光束两两干涉共存在 6 组波矢差, 即  $\mathbf{G}_{21}$ 、 $\mathbf{G}_{32}$ 、 $\mathbf{G}_{43}$  和  $\mathbf{G}_{31}$ 、 $\mathbf{G}_{42}$ 、 $\mathbf{G}_{14}$ 。其中仅有 3 组独立的波矢差, 可选为  $\mathbf{G}_{21}$ 、 $\mathbf{G}_{32}$ 、 $\mathbf{G}_{43}$ 。其余三组满足  $\mathbf{G}_{31} = \mathbf{G}_{21} + \mathbf{G}_{32}$ 、 $\mathbf{G}_{42} = \mathbf{G}_{43} + \mathbf{G}_{32}$ 、 $\mathbf{G}_{14} = \mathbf{G}_{21} + \mathbf{G}_{32} + \mathbf{G}_{43}$ , 为非独立波矢差。根据固体物理知识, 任意两组波矢差组合可产生一套简单光子晶体, 而所有简单光子晶体彼此叠加产生复式光子晶体。

结合图1所示光束配置的特点可知,四光束干涉产生二维复式光子晶体微结构,可以看成若干套二维简单晶格的线性叠加。按照每3束光产生一套二维简单晶格,共有4种组合情况,分别为 $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$ 、 $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$ 、 $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ 和 $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ ,分别产生如图2所示的四种子光子晶体,其中(a)、(c)为平行四边形晶格,(a)的晶格常数较大,(c)的较小;而(b)、(d)均为为矩形晶格,由于光束配置的对称性,这两种晶格完全一致,只是取向不同。它们线性叠加后形成矩形晶格和平行四边形晶格混合的二维复式结构。

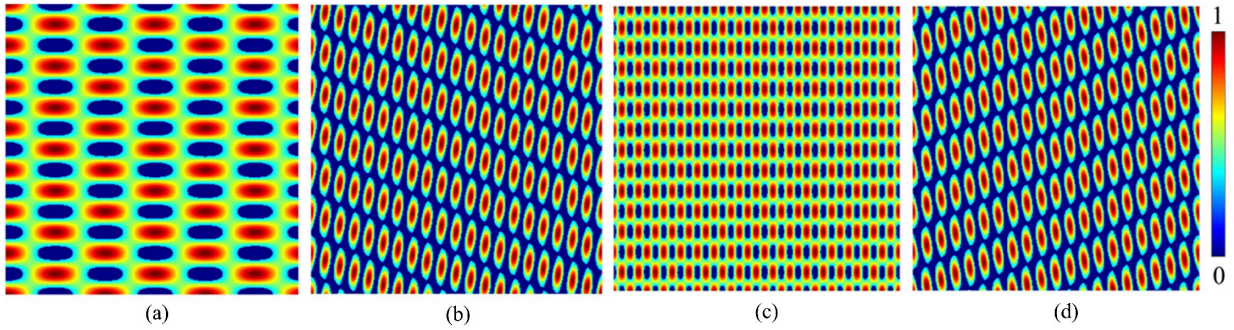


图2 四种不同的三光束组合情况下的仿真结果。(a)  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$ , 平行四边形晶格; (b)  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$ , 矩形晶格;  
(c)  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ , 平行四边形晶格; (d)  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ , 矩形晶格

Fig. 2 Simulation results for four different combinations of three-beam configuration. (a)  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$ , parallelogram lattice;  
(b)  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$ , rectangular lattice; (c)  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ , parallelogram lattice; (d)  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ , rectangular lattice

干涉对比度是描述干涉效果的重要指标,其定义为<sup>[24]</sup>

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

式中:  $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ 分别为干涉强度的最大、最小值。当 $I_{\min} = 0$ 时,  $V = 1$ ,此时干涉图样最清晰,称为完全相干;当 $I_{\max} = I_{\min}$ 时,干涉场为全明或全暗,称之为完全非相干;当 $0 < I_{\min} < I_{\max}$ 时,  $0 < V < 1$ ,干涉图样存在但非最清晰,称之为部分相干。因此,干涉对比度越高,越有利于光子晶体微结构的制作。

为了更好地研究光束偏振组合及其变化对复式光子晶体的影响,利用Matlab语言编写了多光束仿真程序,通过计算机仿真直观形象地展示了光子晶体的特征及演化过程。不失一般性,假定所有干涉光束的振幅均相同,初始相位均为0。为便于后续分析,定义2个重要参数,即偏振度 $\gamma$ 和旋转角 $\beta$ 。其中偏振度定义为 $\gamma_j = E_{bj}/E_{aj}$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ),其含义为第 $j$ 束光的 $E_{bj}$ 与 $E_{aj}$ 分量的比值,后续涉及到的重要偏振情况说明如下,当 $\gamma_j = 0$ ,意味着 $E_{bj} = 0$ ,代表的是沿 $\mathbf{E}_{aj}$ 方向的线偏振光;当 $\gamma_j = 1$ ,意味着 $E_{bj} = E_{aj}$ ,代表的是圆偏振光;当 $\gamma_j \gg 1$ ,例如 $\gamma_j = 10^6$ ,意味着 $E_{bj} \gg E_{aj}$ ,代表的是沿 $\mathbf{E}_{bj}$ 方向的线偏振光;其他情形,例如 $\gamma_j = 0.5$ ,代表的是椭圆偏振光。旋转角 $\beta_j$ 定义为第 $j$ 束光的偏振绕 $\mathbf{k}_j$ 顺时针方向旋转大小为 $\beta_j$ 的角度。

## 2 光束偏振组合对复式光子晶体的影响

由于光束偏振度组合复杂繁多,无法逐一进行研究。为简便起见,选择四种典型的偏振组合情况进行研究,即单光束或双光束、三光束和四光束偏振同时变化情况。对于每种偏振情况,分别研究偏振度 $\gamma$ 和旋转角 $\beta$ 的影响。对于偏振度 $\gamma$ ,其变化为 $0 \rightarrow 0.5 \rightarrow 1 \rightarrow 10^6$ (即沿 $\mathbf{E}_a$ 的线偏振 $\rightarrow$ 长轴沿 $\mathbf{E}_a$ 的椭圆偏振 $\rightarrow$ 圆偏振 $\rightarrow$ 沿 $\mathbf{E}_b$ 的线偏振),此过程中其余光束的偏振度始终保持为0(即沿 $\mathbf{E}_a$ 的线偏振);对于旋转角 $\beta$ ,其变化为相关光束绕其对应的波矢方向按 $0^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 135^\circ$ 旋转。此外,为了保证良好的清晰度,所有计算机仿真的结果均选取 $0.3 I_{\max}$ 作为阈值,低于该阈值的强度设置为0。

### 2.1 单光束偏振变化情况

以  $k_1$  为例研究单光束偏振变化情况。图 3(a)~(d) 为偏振度  $\gamma_1$  变化的仿真结果, 当  $\gamma_1 = 0$ , 即 4 束光均为沿  $E_a$  的线偏振光时, 干涉图样为由波浪条纹和椭圆柱构成的复式光子晶体; 随着  $\gamma_1$  增大到 0.5 (即  $k_1$  变为椭圆偏振光), 波浪条纹变弱而椭圆柱上端伸长; 当  $\gamma_1$  增大到 1 (即  $k_1$  变为圆偏振光), 波浪条纹逐渐分裂退化为椭圆, 而椭圆柱的上端伸长更加明显; 当  $\gamma_1$  增大到  $10^6$  (即  $k_1$  变为沿  $E_b$  的线偏振), 上述变化趋势更加明显, 元胞演变为大小不一的离散椭圆柱。在对比度方面, 随着  $k_1$  的偏振度从 0 增加到  $10^6$ , 对比度  $V$  依次为 1、0.9911、0.9792 和 0.9608, 呈现单调递减趋势, 总体来看, 对比度下降幅度较小。

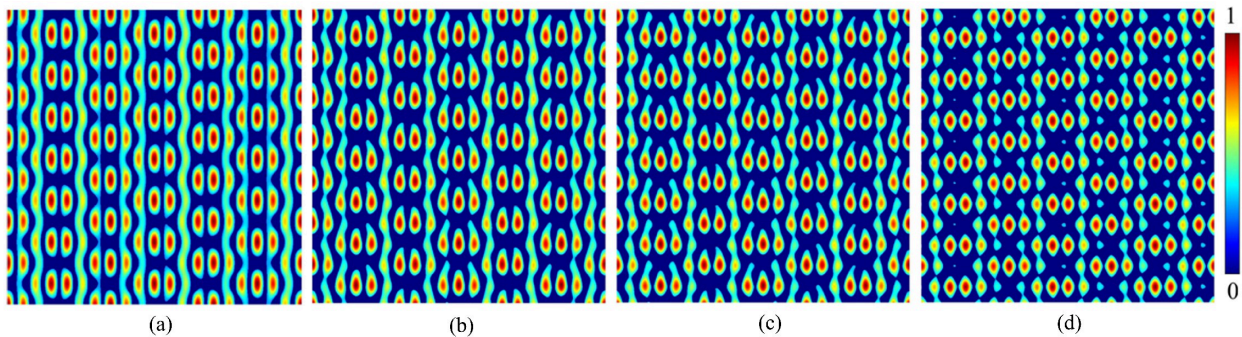


图 3 不同偏振度  $\gamma_1$  仿真结果。(a)  $\gamma_1=0, V=1$ ; (b)  $\gamma_1=0.5, V=0.9911$ ; (c)  $\gamma_1=1, V=0.9792$ ; (d)  $\gamma_1=10^6, V=0.9608$

Fig. 3 Simulation results for different polarization degrees of  $\gamma_1$ . (a)  $\gamma_1=0, V=1$ ; (b)  $\gamma_1=0.5, V=0.9911$ ; (c)  $\gamma_1=1, V=0.9792$ ; (d)  $\gamma_1=10^6, V=0.9608$

图 4 为  $k_1$  线偏振光绕其波矢方向旋转的仿真结果。当  $\beta_1$  增大到  $45^\circ$  时, 元胞的波浪条纹部分彼此分离而形成两端强弱不一的纺锤体, 而椭圆部分占空比降低; 当  $\beta_1$  增大到  $90^\circ$  时, 纺锤体两端强弱发生转换, 并且新出现强度较弱的格点; 当  $\beta_1$  增大到  $135^\circ$  时, 邻近格点两两接触, 形成两端强度各异的长条状分布。在对比度方面, 随着  $\beta_1$  从  $0^\circ$  增加到  $135^\circ$ , 对比度  $V$  依次为 1、0.9252、0.9417 和 0.9464, 呈现急降缓升的特点。

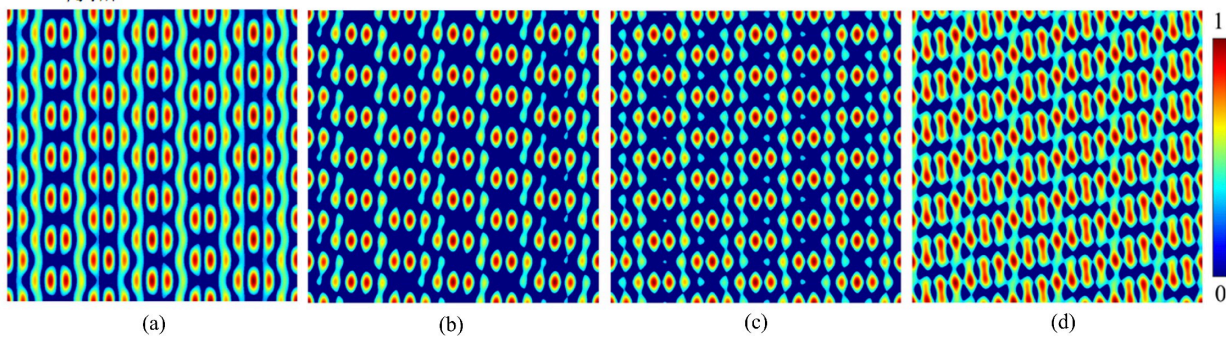


图 4 不同旋转角  $\beta_1$  仿真结果。(a)  $\beta_1=0^\circ, V=1$ ; (b)  $\beta_1=45^\circ, V=0.9252$ ; (c)  $\beta_1=90^\circ, V=0.9417$ ; (d)  $\beta_1=135^\circ, V=0.9464$

Fig. 4 Simulation results for different rotation angles of  $\beta_1$ . (a)  $\beta_1=0^\circ, V=1$ ; (b)  $\beta_1=45^\circ, V=0.9252$ ; (c)  $\beta_1=90^\circ, V=0.9417$ ; (d)  $\beta_1=135^\circ, V=0.9464$

### 2.2 双光束偏振同时变化情况

下面研究两束光偏振同时变化的情况。双偏振同时变化共有 6 种, 可将其概括为“邻”、“间”两种情况。“邻”指的是两个相邻  $k_i$  的偏振同时变化的情况, 共有 4 种, 即  $(k_1, k_2)$ 、 $(k_2, k_3)$ 、 $(k_3, k_4)$  和  $(k_1, k_4)$ 。由图 1(a) 的四光束配置的空间对称性可知,  $(k_2, k_3)$  和  $(k_1, k_4)$  分别等价于  $(k_1, k_2)$  和  $(k_3, k_4)$ , 因此, 4 种“邻”情况可以简化

为  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)$ 、 $(\mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$  2 种情况。“间”指的是两个相间  $\mathbf{k}_i$  的偏振同时变化的情况, 共 2 种, 即  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_3)$  和  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$ 。由于篇幅所限, 此处对于“邻”、“间”情况各选 1 种进行研究, 即  $(\mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$  和  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$  情况。

图 5(a1)~(a4)、(b1)~(b4) 分别为“邻”情况  $(\mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ 、“间”情况  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$  双偏振同时变化的仿真结果。对于“邻”情况, 随着  $(\gamma_3, \gamma_4)$  同时从 0 增加到 0.5 再到 1, 波浪条纹部分逐渐变弱、分离; 椭圆形部分上端逐渐伸长, 进而生成独立的强度较弱的新格点; 当进一步增大到  $10^\circ$  (即沿  $\mathbf{E}_b$  的线偏振), 干涉图案的元胞变为沿水平方向且强度不一的多个椭圆柱。在此过程中, 对比度先从 1 下降到 0.9670, 然后小幅上升至 0.9750, 最后急剧下降到 0.8664。对于图 5(b1)~(b4) 所示的“间”情况  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$  可类似分析, 研究发现在其偏振度从 0 逐渐增大至  $10^\circ$  的过程中, 干涉图案几乎没有变化, 仅对比度略有变化, 由 1 下降到 0.9840, 再到 0.9694, 最后微升至 0.9798。原因在于  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$  的方位角分别为  $0^\circ$  和  $180^\circ$ , 两光束在光束配置图中处于相对位置, 其偏振同时变化使得它们与  $\mathbf{k}_1$ 、 $\mathbf{k}_3$  的干涉强度降低, 导致对比度相应下降, 但对元胞的形状基本没有影响。

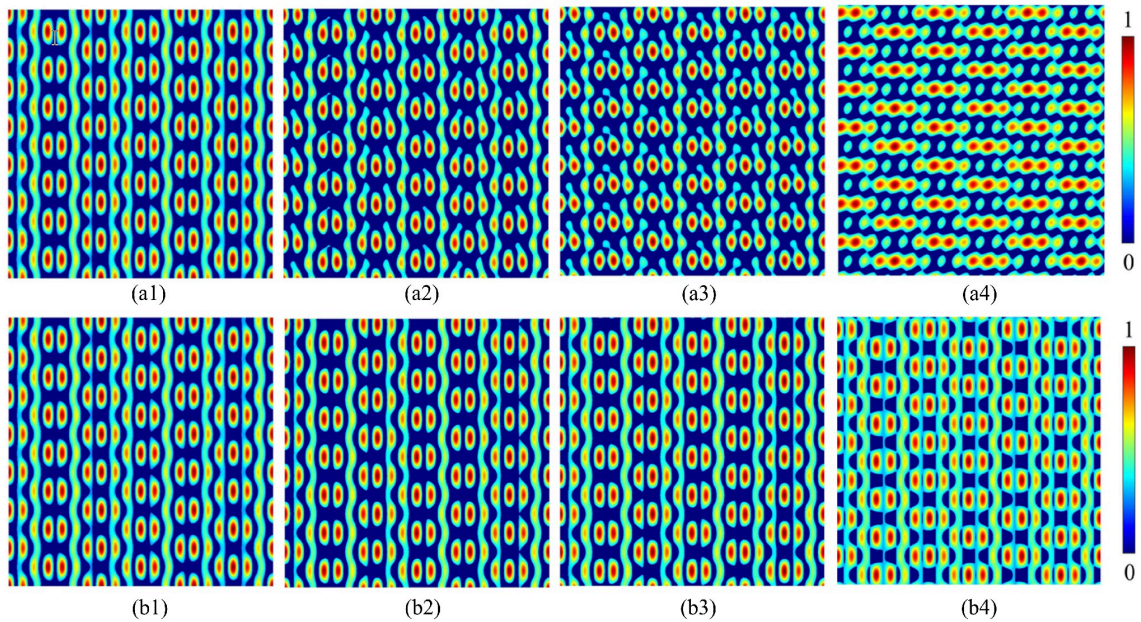


图 5 偏振角改变仿真结果。“邻”情况  $(\gamma_3=\gamma_4=\gamma_{34})$ : (a1)  $\gamma_{34}=0$ ,  $V=1$ ; (a2)  $\gamma_{34}=0.5$ ,  $V=0.9670$ ; (a3)  $\gamma_{34}=1$ ,  $V=0.9750$ ; (a4)  $\gamma_{34}=10^\circ$ ,  $V=0.8664$ 。“间”情况  $(\gamma_2=\gamma_4=\gamma_{24})$ : (b1)  $\gamma_{24}=0$ ,  $V=1$ ; (b2)  $\gamma_{24}=0.5$ ,  $V=0.9840$ ; (b3)  $\gamma_{24}=1$ ,  $V=0.9694$ ; (b4)  $\gamma_{24}=10^\circ$ ,  $V=0.9798$

Fig. 5 Simulation results for different polarization angles. "Neighbor" case  $(\gamma_3=\gamma_4=\gamma_{34})$ : (a1)  $\gamma_{34}=0$ ,  $V=1$ ; (a2)  $\gamma_{34}=0.5$ ,  $V=0.9670$ ; (a3)  $\gamma_{34}=1$ ,  $V=0.9750$ ; (a4)  $\gamma_{34}=10^\circ$ ,  $V=0.8664$ . "Interval" case  $(\gamma_2=\gamma_4=\gamma_{24})$ : (b1)  $\gamma_{24}=0$ ,  $V=1$ ; (b2)  $\gamma_{24}=0.5$ ,  $V=0.9840$ ; (b3)  $\gamma_{24}=1$ ,  $V=0.9694$ ; (b4)  $\gamma_{24}=10^\circ$ ,  $V=0.9798$

图 6(a1)~(a4)、(b1)~(b4) 分别为  $(\mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$  和  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$  同时绕各自波矢方向旋转的仿真结果。对于“邻”情况  $(\mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ , 当  $\beta_3$ 、 $\beta_4$  增大到  $45^\circ$  时, 复式光子晶体的元胞发生了显著变化, 由原来的“波浪条纹+椭圆”变为沿右下到左上的阶梯状分布; 当增大到  $90^\circ$  时, 波浪条纹部分彼此分离形成两端强弱不一的纺锤体, 椭圆形部分占空比降低; 当进一步增大到  $135^\circ$  时, 干涉图样再次发生变化, 元胞演变为两端强度不一的哑铃状和离散的椭圆柱。在此过程中, 对比度由 1 急剧下降至 0.9013、再降至 0.8786, 最后上升至 0.9337, 变化幅度十分明显。类似地对“间”情况  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$  进行分析, 研究发现旋转角对元胞形状的影响同样十分敏感, 值得注意的是,  $\beta_2$ 、 $\beta_4$  同时旋转  $45^\circ$  和  $135^\circ$  时, 两者的元胞形状是完全一样的 (差别仅在于倾斜方向), 由沿特定方向倾斜的椭圆

柱组成,其原因在于  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$  的方位角分别为  $0^\circ$  和  $180^\circ$ , 这两束光旋转  $45^\circ$  和  $135^\circ$  在空间上完全等价。在对比度方面,相应的  $V$  值分别为 1、0.8417、0.8739 和 0.8417, 下降幅度明显,原因在于  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$  光束旋转使得它们与另外 2 束光发生干涉的平行分量减少。注意到  $45^\circ$  和  $135^\circ$  时的对比度完全相同,进一步印证了这两种情况是完全等价的。

可见,对于双偏振变化的“邻”情况,无论是偏振同时改变还是光束同时旋转,它们均对干涉图案的元胞和对比度的影响均较为显著;对于“间”情况,偏振同时改变时对元胞形状和对比度的影响很小,但光束同时旋转时的影响却十分显著。

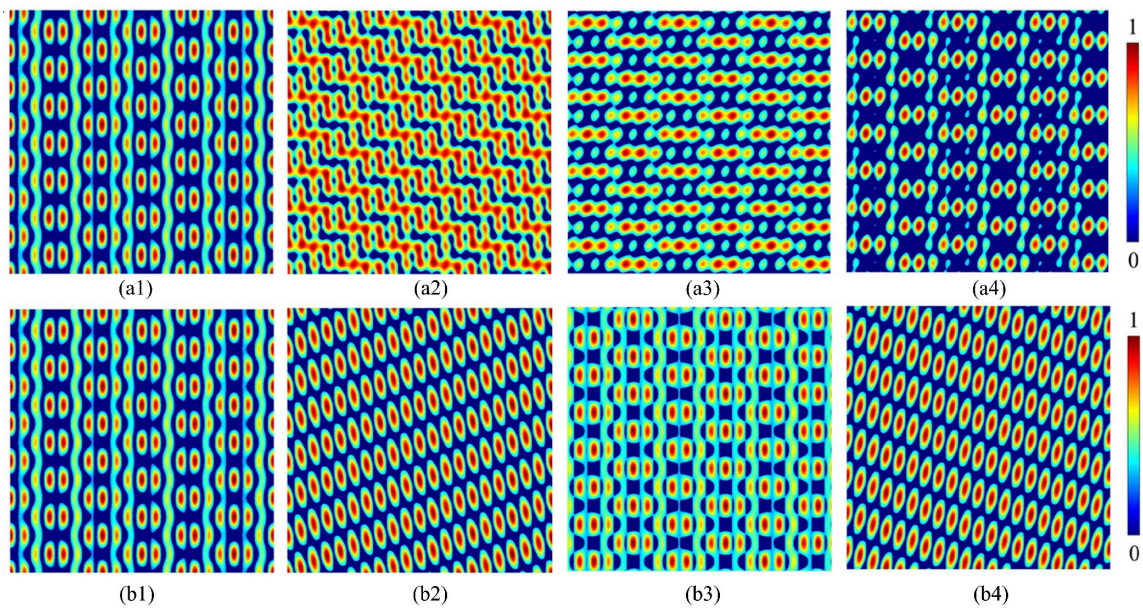


图 6 旋转角改变仿真结果。“邻”情况  $(\beta_3=\beta_4=\beta_{34})$ : (a1)  $\beta_{34}=0^\circ, V=1$ ; (a2)  $\beta_{34}=45^\circ, V=0.9013$ ; (a3)  $\beta_{34}=90^\circ, V=0.8786$ ; (a4)  $\beta_{34}=135^\circ, V=0.9337$ 。“间”情况  $(\beta_2=\beta_4=\beta_{24})$ : (b1)  $\beta_{24}=0^\circ, V=1$ ; (b2)  $\beta_{24}=45^\circ, V=0.7812$ ; (b3)  $\beta_{24}=90^\circ, V=0.8739$ ; (b4)  $\beta_{24}=135^\circ, V=0.8417$

Fig. 6 Simulation results for different polarization angles. "Neighbor" case  $(\beta_3=\beta_4=\beta_{34})$ : (a1)  $\beta_{34}=0^\circ, V=1$ ; (a2)  $\beta_{34}=45^\circ, V=0.9013$ ; (a3)  $\beta_{34}=90^\circ, V=0.8786$ ; (a4)  $\beta_{34}=135^\circ, V=0.9337$ . "Interval" case  $(\beta_2=\beta_4=\beta_{24})$ : (b1)  $\beta_{24}=0^\circ, V=1$ ; (b2)  $\beta_{24}=45^\circ, V=0.7812$ ; (b3)  $\beta_{24}=90^\circ, V=0.8739$ ; (b4)  $\beta_{24}=135^\circ, V=0.8417$

### 2.3 三光束偏振同时变化情况

对于三光束偏振同时变化的情况,其组合共有 4 种,即  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$ 、 $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$ 、 $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$  和  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ , 结合图 1(a) 光束配置的对称性可知,  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_4)$  和  $(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$  是等价的,因此仅有 3 种不同组合情况。因篇幅所限,此处仅选取 2 种情况进行讨论,即情况 1  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$  和情况 2  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$ , 图 7 为相应的仿真结果。对于情况 1,随着  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$  的偏振度从 0 (沿  $E_a$  线偏振) 增加到 0.5 (椭圆偏振) 再到 1 (圆偏振), 波浪条纹部分逐渐变弱分裂为离散椭圆, 而原来分离的椭圆彼此接触相连; 当增大到  $10^6$  (沿  $E_b$  线偏振), 干涉图案的元胞变为沿水平的锯齿状, 其实质是多个强度不一的椭圆连接而成。此过程中对比度从 1 下降到 0.9681, 然后再至 0.9146, 最后急剧上升到 0.9934, 呈现先降后升的特点。对图 7(b1)~(b4) 所示的情况 2  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$  进行类似分析, 发现复式光子晶体的元胞图案变化规律类似, 但是对比度的变化规律有所不同, 先从 1 缓慢下降至 0.9791、0.9597, 最后再急剧下降至 0.7551, 呈现先缓降后剧降的特点。

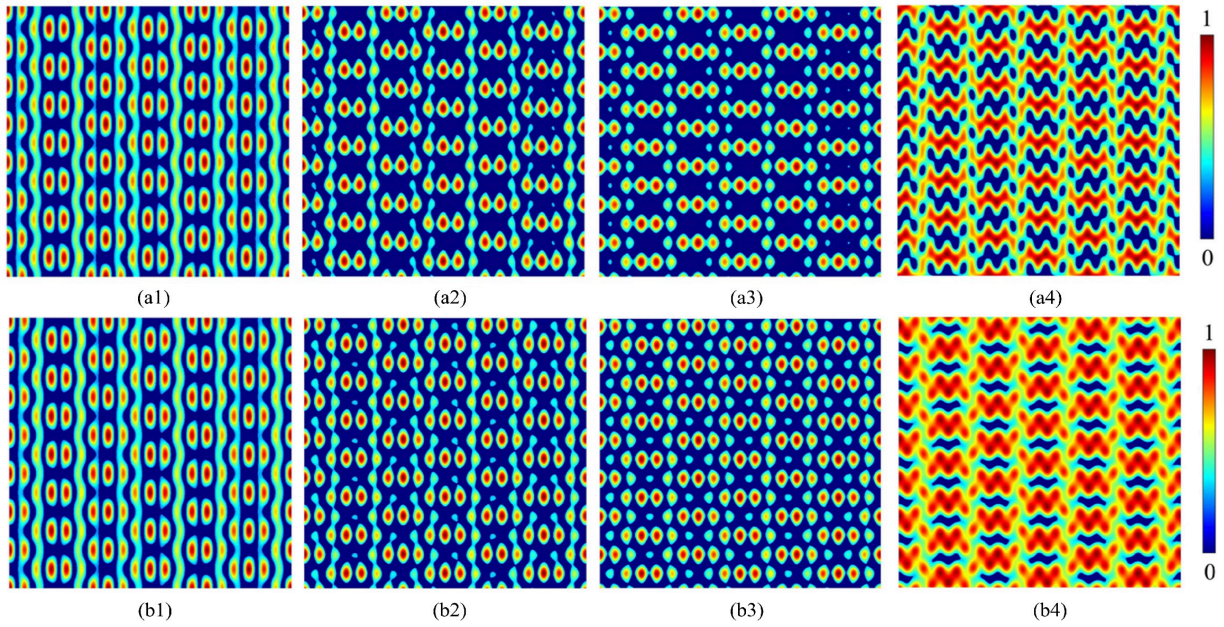


图7 偏振角改变仿真结果。情况1( $\gamma_1=\gamma_2=\gamma_3=\gamma_{123}$ ): (a1)  $\gamma_{123}=0$ ,  $V=1$ ; (a2)  $\gamma_{123}=0.5$ ,  $V=0.9681$ ; (a3)  $\gamma_{123}=1$ ,  $V=0.9146$ ; (a4)  $\gamma_{123}=10^\circ$ ,  $V=0.9934$ 。情况2( $\gamma_1=\gamma_3=\gamma_4=\gamma_{134}$ ): (b1)  $\gamma_{134}=0$ ,  $V=1$ ; (b2)  $\gamma_{134}=0.5$ ,  $V=0.9791$ ; (b3)  $\gamma_{134}=1$ ,  $V=0.9597$ ; (b4)  $\gamma_{134}=10^\circ$ ,  $V=0.7551$

Fig. 7 Simulation results for different polarization angles. Case 1 ( $\gamma_1=\gamma_2=\gamma_3=\gamma_{123}$ ): (a1)  $\gamma_{123}=0$ ,  $V=1$ ; (a2)  $\gamma_{123}=0.5$ ,  $V=0.9681$ ; (a3)  $\gamma_{123}=1$ ,  $V=0.9146$ ; (a4)  $\gamma_{123}=10^\circ$ ,  $V=0.9934$ . Case 2 ( $\gamma_1=\gamma_3=\gamma_4=\gamma_{134}$ ): (b1)  $\gamma_{134}=0$ ,  $V=1$ ; (b2)  $\gamma_{134}=0.5$ ,  $V=0.9791$ ; (b3)  $\gamma_{134}=1$ ,  $V=0.9597$ ; (b4)  $\gamma_{134}=10^\circ$ ,  $V=0.7551$

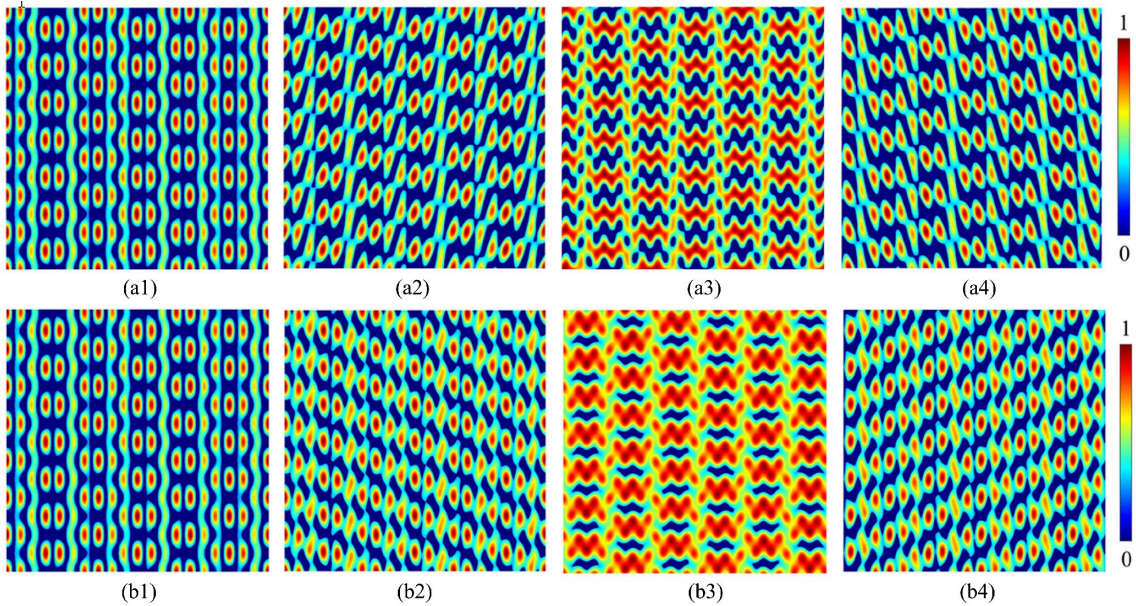


图8 旋转角改变仿真结果。情况1( $\beta_1=\beta_2=\beta_3=\beta_{123}$ ): (a1)  $\beta_{123}=0^\circ$ ,  $V=1$ ; (a2)  $\beta_{123}=45^\circ$ ,  $V=0.9601$ ; (a3)  $\beta_{123}=90^\circ$ ,  $V=0.9720$ ; (a4)  $\beta_{123}=135^\circ$ ,  $V=0.9673$ 。情况2( $\beta_1=\beta_3=\beta_4=\beta_{134}$ ): (b1)  $\beta_{134}=0^\circ$ ,  $V=1$ ; (b2)  $\beta_{134}=45^\circ$ ,  $V=0.8821$ ; (b3)  $\beta_{134}=90^\circ$ ,  $V=0.8382$ ;

(b4)  $\beta_{134}=135^\circ$ ,  $V=0.8554$

Fig. 8 Simulation results for different polarization angles. Case 1 ( $\beta_1=\beta_2=\beta_3=\beta_{123}$ ): (a1)  $\beta_{123}=0^\circ$ ,  $V=1$ ; (a2)  $\beta_{123}=45^\circ$ ,  $V=0.9601$ ; (a3)  $\beta_{123}=90^\circ$ ,  $V=0.9720$ ; (a4)  $\beta_{123}=135^\circ$ ,  $V=0.9673$ . Case 2 ( $\beta_1=\beta_3=\beta_4=\beta_{134}$ ): (b1)  $\beta_{134}=0^\circ$ ,  $V=1$ ; (b2)  $\beta_{134}=45^\circ$ ,  $V=0.8821$ ; (b3)  $\beta_{134}=90^\circ$ ,  $V=0.8382$ ; (b4)  $\beta_{134}=135^\circ$ ,  $V=0.8554$



图 8(a1)~(a4)、(b1)~(b4) 分别为情况 1、情况 2 三束线偏振光同时绕各自波矢方向旋转的仿真结果。对于情况 1, 当  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$  的偏振旋转  $45^\circ$  时, 元胞中的波浪条纹和椭圆柱均顺时针旋转过一定角度, 部分格点首尾相连; 当旋转  $90^\circ$  时, 多个强度各异的椭圆格点彼此接触, 使得元胞形成沿水平方向的锯齿状分布; 当旋转角度进一步增大到  $135^\circ$  时, 其形成的干涉图案与  $45^\circ$  的情况完全相同 (不同之处在于元胞的朝向不一样), 这是由光束配置图中  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$  的对称性决定的。在此过程中, 对比度有所下降, 但降幅不大。类似分析情况 2  $(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4)$  的仿真结果, 发现情况 2 具有与情况 1 相似的演变规律, 在此不再赘述。

### 2.4 四光束偏振同时变化情况

由以上分析可知, 当 4 束光均为沿  $\mathbf{E}_a$  的线偏振时, 干涉图案 (即复式光子晶体) 具有最佳对比度 1。图 9 为 4 束光的偏振度同时变化的仿真结果。随着偏振度按  $0 \rightarrow 0.5 \rightarrow 1$  逐步变化, 其干涉图案的波浪条纹部分逐渐变弱最终彼此分离, 椭圆部分逐渐接触相连, 当偏振度进一步增到  $10^\circ$  时, 元胞再次退化为“波浪条纹+彼此相连椭圆”形状, 如图 9(d) 所示。在对比度方面, 其数值由 1 降至 0.9601, 再增大到 0.9915, 最后显著降低至 0.7837。可见 4 束光的偏振同时变化对复式光子晶体的元胞和对比度均有显著的影响。

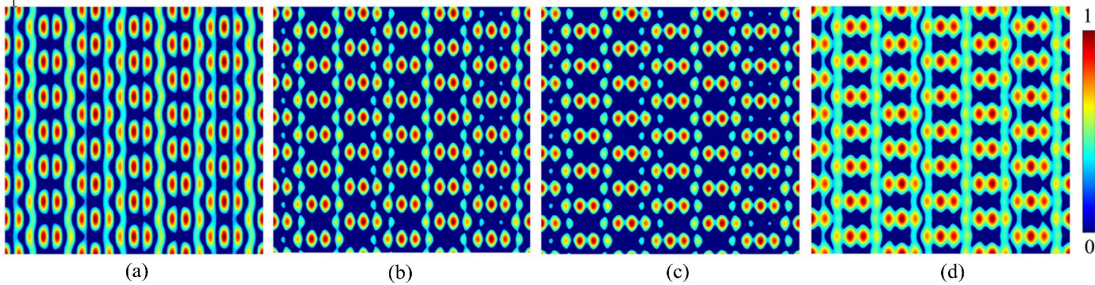


图 9 不同偏振度仿真结果。(a)  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 0, V = 1$ ; (b)  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 0.5, V = 0.9601$ ; (c)  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 1, V = 0.9915$ ; (d)  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 10^\circ, V = 0.7837$

Fig. 9 Simulation results for different polarization degrees. (a)  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 0, V = 1$ ; (b)  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 0.5, V = 0.9601$ ; (c)  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 1, V = 0.9915$ ; (d)  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 10^\circ, V = 0.7837$

最后, 分析 4 束线偏振光同时绕各自波矢方向旋转对复式光子晶体的影响。图 10 为仿真结果, 可以看出, 无论  $\mathbf{k}_1 \sim \mathbf{k}_4$  旋转  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  还是  $135^\circ$ , 复式光子晶体的元胞形状基本不变, 仅在  $0^\circ \sim 45^\circ$  过程中, 复式光子晶体整体向左发生了平移。在对比度方面, 对比度由 1 下降到 0.8831、再降至 0.8353, 最后再略升至 0.8517, 呈现先剧降后缓升的特点。总体来看, 4 束光偏振同时旋转对干涉图案的影响不大, 但是在对比度方面的影响较为显著。

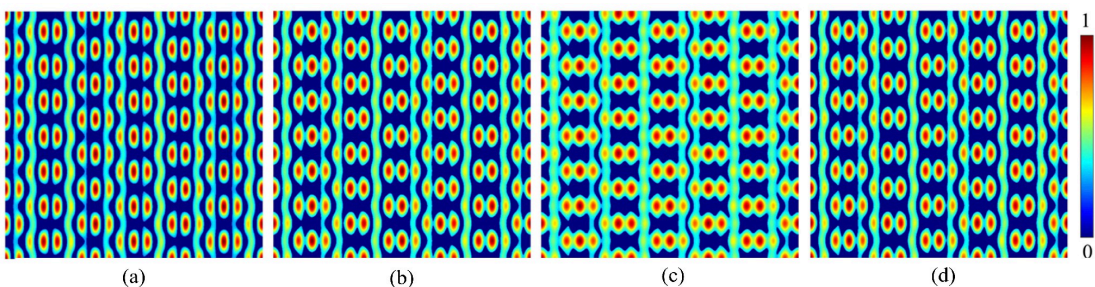


图 10 不同旋转角仿真结果。(a)  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0^\circ, V = 1$ ; (b)  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 45^\circ, V = 0.8831$ ; (c)  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 90^\circ, V = 0.8353$ ; (d)  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 135^\circ, V = 0.8517$

Fig. 10 Simulation results for different rotation angles. (a)  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0^\circ, V = 1$ ; (b)  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 45^\circ, V = 0.8831$ ; (c)  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 90^\circ, V = 0.8353$ ; (d)  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 135^\circ, V = 0.8517$

上述数值仿真结果在复式光子晶体实验制作方面具有一定的参考意义。在制作误差方面,晶格类型完全取决于四束光之间的夹角,即各光束的波矢差,光束方向存在微小偏差对晶格类型影响不大;与此不同,晶格元胞形状敏感依赖于光束偏振,通过选取不同偏振组合或调节特定光束的偏振度,可灵活改变元胞的形状及对比度,因此在实验制作中应尽量提升光束偏振的稳定性。

### 3 结 论

以多光束干涉原理为基础,设计了一种具有一定对称性的四光束配置用于产生复式光子晶体。利用 MATLAB 编程进行计算机仿真,按单光束、双光束、三光束和四光束进行分类,系统研究了偏振同时变化(包括偏振度、旋转)对复式光子晶体的元胞形状和对比度的影响。研究表明各光束的偏振组合及调节对复式光子晶体具有显著影响,在不同的偏振条件下获得了波浪条纹、椭圆柱、锯齿状等丰富的元胞形状。上述结果对制作特定元胞形状的复式光子晶体和开展虚拟实验教学研究具有一定的理论指导意义。

#### 参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] Chen M, Wan T, Wang Z, *et al.* One-dimensional magnetic photonic crystal structures with wide absolute bandgaps [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(1): 014204.  
陈敏, 万婷, 王征, 等. 宽绝对禁带的一维磁性光子晶体结构 [J]. *物理学报*, 2017, 66(1): 014204.
- [4] Gan L, Li Z Y. Photonic crystal cavities and integrated optical devices [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(11): 114203.
- [5] Yuan J, Shu J, Jiang L Y. Multifunctional beam steering via switchable negative refraction, self-collimation, and zero refraction effects in conventional and annular photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5367-5377.
- [6] Fei H M, Yan S, Xu Y C, *et al.* Photonic crystal heterostructure with self-collimation effect for broad-band asymmetric optical transmission [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(18): 184214.  
费宏明, 严帅, 徐瑜成, 等. 可实现宽频带光波非对称传输的自准直效应光子晶体异质结构 [J]. *物理学报*, 2020, 69(18): 184214.
- [7] Liang W Y, Chen J F, Li Z Y. Electrically controlled beam steering with wide deflection angles in liquid crystal photonic crystals [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(7): 075106.
- [8] Zhuang S N, Chen J F, Liang W Y, *et al.* Zero GVD slow-light originating from a strong coupling of one-way modes in double-channel magneto-optical photonic crystal waveguides [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2478-2487.
- [9] Fang H M, Tian M, Chang S Q, *et al.* Optical absorption properties in one-dimensional graphene-based photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(5): 589-593.  
房慧敏, 田敏, 常诗琦, 等. 一维石墨烯基光子晶体光吸收特性研究 [J]. *量子电子学报*, 2018, 35(5): 589-593.

- [10] Qi Z M. Research on computer simulations of two-dimensional complex microstructures [J]. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 37(2): 138-142.  
戚志明. 复式二维微结构的计算机模拟 [J]. 沈阳师范大学学报 (自然科学版), 2019, 37(2): 138-142.
- [11] Feng Z F, Wang Y Q, Zhang D Z, *et al.* Implementation of complete band gap in 2-D photonic crystals using complex unit cell [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2004, 30(3): 390-392.  
冯志芳, 王义全, 张道中, 等. 利用复式原胞实现二维光子晶体中的完全带隙 [J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(3): 390-392.
- [12] Jiang J Q, Rosales-Guzmán C, Zhu Z H. Perfect flattop vortex beams [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2022, 39(1): 136-141.  
姜嘉琪, Rosales-Guzmán C, 朱智涵. 完美平顶涡旋光束 [J]. 量子电子学报, 2022, 39(1): 136-141.
- [13] Mao W D, Zhong Y C, Dong J W, *et al.* Crystallography of two-dimensional photonic lattices formed by holography of three noncoplanar beams [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(5): 1085-1091.
- [14] Lü H, Zhao Q L, Zhang Q Y, *et al.* Fabrication of two-dimensional superposed microstructure by interference lithography [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(3): 302-305.
- [15] Leibovici M C R, Gaylord T K. Performance simulation of 2D photonic-crystal devices fabricated by pattern-integrated interference lithography [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3798-3801.
- [16] Lü H, You K, Lan Y Y, *et al.* Fabrication of two-dimensional micro-nano photonic structures by symmetry-lost beams interference [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(21): 217801.  
吕浩, 尤凯, 兰燕燕, 等. 非对称光束干涉制备二维微纳光子结构研究 [J]. 物理学报, 2017, 66(21): 217801.
- [17] Qi Z M, Liang W Y, Chen W H. Computer simulation and design of real-time holographic fabrication of microstructures [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, 53(4): 69-73.  
戚志明, 梁文耀, 陈武喝. 实时全息微结构制作的计算机仿真与设计 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(4): 69-73.
- [18] Sun X H, Wu Y L, Liu W, *et al.* Fabrication of ten-fold photonic quasicrystalline structures [J]. *AIP Advances*, 2015, 5(5): 057108.
- [19] Dhuey S, Testini A, Koshelev A, *et al.* Three-dimensional woodpile photonic crystals for visible light applications [J]. *Journal of Physics Communications*, 2017, 1(1): 015004.
- [20] Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms [J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(17): 2295-2298.
- [21] Jin C J, McLachlan M A, McComb D W, *et al.* Template-assisted growth of nominally cubic (100)-oriented three-dimensional crack-free photonic crystals [J]. *Nano Letters*, 2005, 5(12): 2646-2650.
- [22] Pang Y K, Lee J, Lee H, *et al.* Chiral microstructures (spirals) fabrication by holographic lithography [J]. *Optics Express*, 2005, 13(19): 7615-7620.
- [23] Liang G Q, Mao W D, Zou H, *et al.* Holographic formation of large area split-ring arrays for magnetic metamaterials [J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, 55(9): 1463-1472.
- [24] Liang W Y, He R B, Lin D R, *et al.* Influence of beam polarizations on holographic fabrication of triangular photonic crystals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 091601.  
梁文耀, 何锐斌, 林灯荣, 等. 光束偏振对三角光子晶体全息制作影响的仿真研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091601.